

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВТОРИЧНЫХ ТОКОПОДВОДОВ РУДНОТЕРМИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ

Алиферов А.И., Горева Л.П., Агарин А.В., Бикеев Р.А., Игнатенко А.Ю., Творогов С.И.
Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия, elterm@ngs.ru

Аннотация — В данной работе предложен метод расчета активного и индуктивного сопротивлений шихтованных пакетов руднотермических электропечей. Метод разработан на основе регрессионного анализа результатов исследования зависимости активного и индуктивного сопротивлений шихтованных пакетов от их геометрических размеров, взаимного расположения и способа перешихтовки с помощью ПО ANSYS. Предложенный метод позволяет решить задачи минимизации и симметрирования параметров шихтованных пакетов руднотермических печей.

Ключевые слова — руднотермическая печь, вторичный токоподвод, шихтованный пакет проводников, активное и индуктивное сопротивление, симметрия трехфазного токоподвода.

ВВЕДЕНИЕ

Продукция, получаемая в ферросплавных печах необходима при производстве стали, поэтому объем производства ферросплавов имеет тенденцию постоянного роста.

Основными условиями, которым должна удовлетворять короткая сеть руднотермической печи, являются: минимальные активные и индуктивные сопротивления фаз и их симметрия.

Параметры короткой сети оказывают большое влияние на технико-экономические показатели работы печи: коэффициент мощности, симметрию нагрузки фаз, удельный расход электроэнергии, электрический КПД и т.д. По проводникам короткой сети протекают весьма большие токи промышленной частоты, которые создают вокруг проводников сильные магнитные поля. Вследствие этого большое значение приобретают такие явления, как поверхностный эффект, эффект близости, неравномерное распределение тока по отдельным проводникам, перенос мощности между отдельными проводниками и фазами, потери энергии в металлических конструкциях и др.

Реактивное сопротивление короткой сети в значительной степени ухудшает электрические и эксплуатационные показатели печи. Активное сопротивление вторичного токоподвода определяет величину электрического КПД печи.

Наиболее распространенной для круглых трехэлектродных печей является схема вторичного токоподвода «треугольник на электродах». Она характеризуется тем, что преобразование схемы треугольника в звезду осуществляется непосредственно на электродах, а, значит, до электродов протекают токи

полуфаз в соответствии с компоновкой выводов трансформатора (рис. 1).

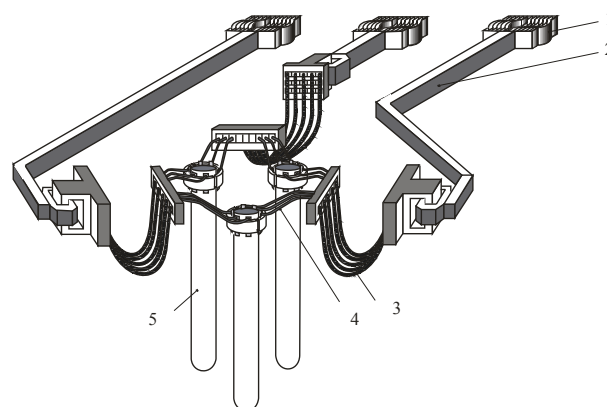


Рис. 1. Эскиз вторичного токоподвода трехэлектродной руднотермической печи: 1 – компенсаторы; 2 – трубчатый шинопакет; 3 – гибкий токоподвод; 4 – трубки электрододержателя; 5 – электрод.

Современные мощные руднотермические печи в конструкции вторичного токоподвода имеют жесткий неподвижный участок (см. рис. 1), выполняемый в виде пакета прямоугольных шин или водоохлаждаемых трубошин. Зачастую он является самым протяженным из всех участков короткой сети.

Общее число шин в пакете соответствует, как правило, числу выводов низкой стороны печного трансформатора. Размеры поперечного сечения медных шин обычно не превышают 400×12 мм. Толщина медных шин 10-12 мм является оптимальной по условиям поверхностного эффекта, высота 400 мм является максимальной по условиям охлаждения пакета шин.

При оценке возможности и целесообразности применения трубчатого токоподвода необходимо учитывать следующее: токоведущие трубы, по сравнению с прямоугольными шинами, обладают повышенной индуктивностью. В то же время активное сопротивление водоохлаждаемой трубы за счёт более низкой температуры нагрева заметно ниже по сравнению с шинами.

Исходя из вышеперечисленного, можно составить таблицу основных конструктивных данных коротких сетей некоторых отечественных рудно-термических печей (табл. 1) [1].

Анализ конструктивного исполнения реальных систем проводников шихтованных пакетов

руднотермических электропечей показывает, что в трехфазной системе токоподвода фазы отдалены друг от друга настолько, что их электромагнитные поля практически не взаимодействуют. В этом случае ставится задача расчета активного и индуктивного сопротивлений фазы расшихтованного токоподвода, который представляет собой систему параллельных проводников с токами встречных направлений. С другой стороны, данные табл. 1 показывают, насколько могут отличаться по длине шихтованные пакеты фаз, а значит, необходимо решать задачу симметрирования.

С целью снижения индуктивного сопротивления жесткие участки коротких сетей (позиция 2 рисунка 1) по возможности выполняются сбиблированными. На практике бифилиция осуществляется перешихтовкой проводников в пакете. Перешихтовка прямоугольных шин заключается в чередовании проводников полуфаз. Варианты перешихтовки трубчатого пакета приведены на рис. 2.

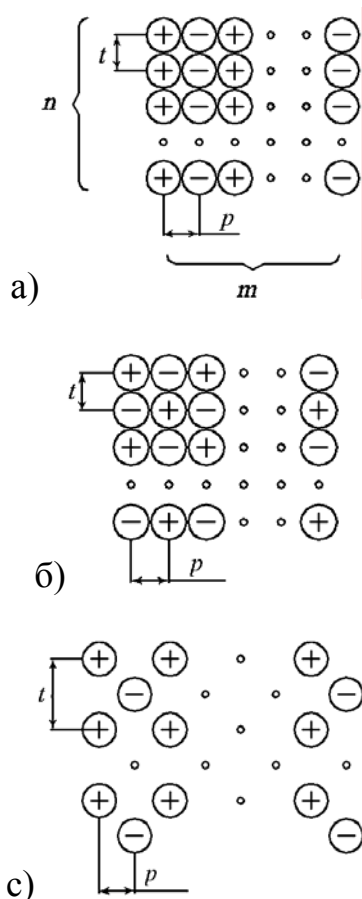


Рис. 2. Варианты перешихтовки многофазных пакетов трубошин: а) коридорный, б) шахматный, в) коридорный со смещением по вертикали.

Таблица 1

Основные конструктивные данные шинных пакетов коротких сетей рудно-термических печей.

Тип печной установки	Количество, сечение на полуфазу, мм	Размеры шинного пакета, мм				
		l_1	l_2	l_3	t	p
РКЗ-80,0/у	16(Ø60×10)	22040	10780	22040	80	80

РКЗ-48,0 ф	8(Ø60×10)	4600	4500	4600	80	80
РКЗ-72,0 ф	8(Ø60×12,5)	4750	4600	4750	80	80
РКО-16,5	6(300×12)	14300	4600	14300	27	-
РКО-10,5	4(250×12)	14500	6800	6600	27	-
РКЗ-16,5	6(300×12)	12200	5400	12200	27	-

МЕТОД РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЙ

На кафедре АЭТУ НГТУ была проведена работа по созданию новой методики расчета активного и индуктивного сопротивлений шихтованных пакетов трубошин и прямоугольных шин. В основу методики положены многовариантные расчеты параметров пакетов шин при варьировании геометрическими характеристиками (диаметр и толщина стенки трубошин, размеры сечения прямоугольных шин a и b , расстояния t и p , см. рис. 2) и количеством проводников в пакете (m и n) [2, 3].

Обработка результатов по методикам регрессионного анализа позволила получить эмпирические формулы вида

$$R \text{ (или } X) = b_0 \cdot n^{b_n} \cdot m^{b_m} \cdot p^{b_p} \cdot t^{b_t}, \text{ Ом/м,} \quad (1)$$

для трубчатого пакета и

$$R \text{ (или } X) = b_0 \cdot n^{b_n} \cdot a^{b_a} \cdot b^{b_b} \cdot t^{b_t}, \text{ Ом/м,} \quad (2)$$

для пакета прямоугольных шин, описывающие результаты серий численных экспериментов. Качество описания эмпирической формулой оценивалось коэффициентом детерминированности r^2 , который нормирован от 0 до 1, и определяется на основе сравнения фактических значений функций и значений, получаемых по эмпирической формуле. В табл.2 для примера представлены коэффициенты регрессионных уравнений (1, 2) для пакета трубошин диаметром 0,05м, с толщиной стенки 0,01м, перешихтованных коридорным способом.

Процесс расчета в таком случае сводится к подготовке исходных данных, постановке их в формулу и получению результата. Для этого достаточно иметь общедоступное программное обеспечение – MS Office.

Разработанная методика позволяет легко рассчитывать активное и индуктивное сопротивление шихтованных пакетов руднотермических печей и анализировать влияние конструктивных решений этого участка токоподвода на уровень несимметрии его электрических параметров. Например, конструктивно обусловлен тот факт, что длина шинопакета средней фазы меньше длины шинопакетов крайних фаз, а значит, на этом участке закладывается несимметрия токоподвода в целом (см. рис. 1). Но индуктивное сопротивление зависит не только от длины проводников, но и от геометрии сечения. Если увеличить расстояние между шинами в пакете t , то индуктивное сопротивление пакета будет увеличиваться, значит можно сделать сопротивление шинопакета средней фазы равным индуктивному сопротивлению крайней фазы.

Таблица 2

Коэффициенты для расчета сопротивлений пакетов трубошин диаметром 0,05м, с толщиной стенки 0,01м, перешихтованных коридорным способом

R/X	b_0	b_n	b_m	b_t	b_p	r_2
R	$3,597 \cdot 10^{-5}$	-0,9306	-1,238	-0,1775	-0,266	0,99
X	$3,800 \cdot 10^{-5}$	-0,9188	-0,3185	18,85	2,711	0,98

Для примера были рассмотрены шинопакеты крайней и средней фаз установок РКО-16,5 (руднотермическая круглая открытая, мощностью 16,5 МВА) и РКЗ-80. Рабочий ток электрода первой из них имеет величину порядка 60 кА. Такой ток можно канализировать по прямоугольным шинам. Вторая печь работает на номинальном режиме порядка 170 кА [1]. Ее токоподвод полностью водоохлаждаемый. Шинопакет выполнен из трубошин. Размеры шинопакета приведены в табл. 1. В табл. 3 приведены параметры шинопакетов крайней и средней фаз этих установок.

Таблица 3

Параметры шинопакета установки РКО-16,5 [1]

Печь	Индуктивное сопротивление, МОм		Способ симметрирования
	Крайняя фаза	Средняя фаза	
РКЗ-16,5	0,11	0,05	Увеличение t до 90 мм
РКЗ-80	0,13	0,063	Переход с шахматного на коридорный вариант шихтовки, увеличение p до 100 мм

Как правило, расстояние между шинами делают минимальным, оно должно удовлетворять Правилам Устройства Электроустановок. Максимальное расстояние ограничено только приемлемостью габаритов конструкции. Расчеты показали, что для печи РКО-16,5 при увеличении расстояния между шинами в средней фазе до 0,09 м ее индуктивное сопротивление становится равным индуктивному сопротивлению крайней фазы. У трубчатых шинопакетов индуктивное сопротивление определяется не только геометрией участка, но и способом перешихтовки (см. рис. 2). Наименьшее сопротивление обеспечивает шахматный способ, поэтому он используется для шинопакетов длинных крайних фаз. Коридорный вариант дает более высокое индуктивное сопротивление, поэтому для уравнивания сопротивлений фаз целесообразно короткую среднюю фазу перешихтовать коридорным способом. Некоторое увеличение расстояния между рядами проводников полуфаз позволяет окончательно уравнивать индуктивности фаз. Таким образом, разработанная методика позволяет легко определять параметры шинопакетов фаз, обеспечивающие их симметрию.

Разработанная методика расчета также была применена для симметрирования жесткого токоподвода руднотермической печи мощностью 10 МВА. Жесткий токоподвод состоит из трубошин по 2 на полуфазу, расположенных в вертикальный ряд с чередованием полуфаз. Средняя фаза на 2,5 м короче крайней, а значит, очевидна резкая несимметрия сопротивлений на этом участке. Решался вопрос о симметрировании, а значит о способе увеличения индуктивного сопротивления средней фазы или уменьшения этого параметра в крайних фазах. Сначала предполагали удлинить участок в средней фазе, изменив траекторию проводников с прямолинейной на петлеобразную. Но индуктивное сопротивление также очень чувствительно к транспозиции проводников в сечении. Поэтому было предложено отказаться от перешихтовки проводников средней фазы, сохранив от выводов трансформатора расстояние между полуфазами неизменным. Это позволило уменьшить коэффициент несимметрии индуктивного сопротивления с 58% до 27%. Стала очевидной нецелесообразность применения петли. До 17% снизить коэффициент несимметрии удалось за счет уменьшения расстояния между проводниками внутри полуфаз средней фазы в 2 раза. Поскольку доля данного участка в индуктивном сопротивлении фазы около 10%, а сопротивления остальных участков одинаковы для разных фаз, то интегральный коэффициент несимметрии уже менее 5% и основную задачу можно считать решенной.

Таким образом, разработанный метод удобен для расчета активного и индуктивного сопротивлений шихтованных пакетов руднотермических электропечей. С его помощью можно легко прорабатывать конструктивные варианты с целью симметрирования короткой сети электропечи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Данцис Я.Б. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей: Справ. изд. / Я. Б. Данцис, Л. С. Кацевич, Г. М. Жиров и др. / 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия.- 1987.- 320 с.
2. Интегральные электрические параметры расшихтованного жесткого токоподвода руднотермической электропечи / А. И. Алиферов, Р. А. Бикеев, Л. П. Горева, Д. В. Скрипко, Я. В. Катасонова // Электротехника, 2011, № 6, с. 30–35.
3. Моделирование электромагнитных полей шихтованных пакетов электротехнологических установок / А. И. Алиферов, Р. А. Бикеев, Л. П. Горева, А. Ю. Игнатенко // Известия высших учебных заведений. Электромеханика, 2013, № 6, с. 45-47.